

深度调峰工况下 350 MW 汽轮机组低压缸流场与温度场分布特性研究

吴昕¹, 李前宇², 薛常海², 李洪伟³

(1. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045; 2. 京能秦皇岛热电有限公司, 河北 秦皇岛 066000;
3. 东北电力大学 能源与动力工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 针对某电厂 350 MW 超临界机组汽轮机低压缸结构, 建立了由末 5 级叶栅通道组成的低压缸通流区域单通道三维模型。选取从热耗率验收工况 (THA) 降低至 1.5% THA 的 7 种运行工况, 构建了低压缸蒸汽流量变化全域图谱。利用计算流体力学方法, 在不同蒸汽流量下对末级汽轮机低压缸流场以及温度场进行计算。计算结果表明: 在 THA 工况下, 蒸汽能够顺畅地流过低压缸通道; 随着蒸汽流量降低, 回流涡出现在末级动叶叶根以及中弦后方区域, 叶栅通道蒸汽流动混乱度逐渐增强; 当蒸汽流量降低到 14% THA 时, 末级动叶进入到鼓风加热状态, 蒸汽对末级动叶做负功, 末级动叶内功率为负值; 当蒸汽流量降低到 5.8% THA 时, 末级动叶吸力面顶部出现小范围 200 °C 高温区域; 当蒸汽流量降低到 3.0% THA 时, 鼓风加热现象加剧, 末级动叶顶部和静叶吸力面的叶尖区均出现了 200 °C 高温区域, 必须采取必要的措施予以低压缸降温。

关键词: 汽轮机; 低压缸; 小流量工况; 深度调峰; 蒸汽流量

中图分类号: TK221 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2022.09.007

[引用本文格式] 吴昕, 李前宇, 薛常海, 等. 深度调峰工况下 350 MW 汽轮机组低压缸流场与温度场分布特性研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(9): 59-65. WU Xin, LI Qian-yu, XUE Chang-hai, et al. Research on distribution characteristics of flow and temperature fields of 350 MW steam turbine low pressure cylinder under deep peak regulation condition[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(9): 59-65.

Research on Distribution Characteristics of Flow and Temperature Fields of 350 MW Steam Turbine Low Pressure Cylinder under Deep Peak Regulation Condition

WU Xin¹, LI Qian-yu², XUE Chang-hai², LI Hong-wei³

(1. North China Electric Power Research Institute Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100045;
2. Jingneng Qinhuangdao Thermal Power Co., Ltd, Qinhuangdao, China, Post Code: 066000;
3. School of Energy and Power Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin, China, Post Code: 132012)

Abstract: Aiming at the steam turbine low pressure cylinder structure of the 350 MW supercritical unit in a power plant, a single-channel three-dimensional model of the low pressure cylinder flow area composed of the last five cascade channels was established. Seven operating conditions reduced from turbine heat acceptance (THA) operating condition to 1.5% THA operating condition were selected, thereby constructing a global map of the low-pressure cylinder steam flow change. The computational fluid dynamics method was used to calculate the low pressure flow field and temperature field of the last stage steam turbine low pressure cylinder at different steam flow rates. The research results show that steam can flow smoothly through the low pressure cylinder passage under THA working condition. With the decrease of

收稿日期: 2021-09-26; 修订日期: 2022-01-18

基金项目: 汽轮机低压末级流场测量研究 (JQRD-FW-2019-051)

Fund-supported Project: Study on Measurement of Flow Field in Final Stage of Low Pressure Cylinder of Steam Turbine (JQRD-FW-2019-051)

作者简介: 吴昕 (1992-), 男, 江苏兴化人, 华北电力科学研究院有限责任公司工程师。

steam flow, the recirculation vortex appears at the area behind the middle chord area and the last stage moving blade root, and the steam flow chaos in the cascade channel gradually increases. When the steam flow is reduced to 14% THA, the last stage moving blade enters into the blast heating state, the steam does negative work on the last stage moving blade, and the power inside the last stage moving blade is negative. When the steam flow is reduced to 5.8% THA, a small area of 200 °C high temperature appears on the top of the last stage moving blade suction surface. When the steam flow is reduced to 3.0% THA, the blast heating phenomenon is intensified, and the high temperature areas of 200 °C both appear on the top of last stage moving blade and the tip area of stationary blade suction surface. At this time, necessary measures must be taken to cool the low-pressure cylinder.

Key words: steam turbine, low pressure cylinder, small flow conditions, deep peak regulation, steam flow

引 言

汽轮机是现代火力发电厂的主要设备,也是现代化国家重要的动力机械设备。它是一种旋转式蒸汽动力装置,可以将蒸汽的热能转化为带动发电机做功的机械能。随着能源需求的不断增长,汽轮机正朝着高参数、大容量、优性能的方向发展。汽轮机通流部分的流动情况较为复杂,在设计工况下,汽轮机运行性能最优、经济性最高、安全性最好。但是在实际运行中,汽轮机多在偏离设计工况条件下运行^[1-2],当电厂低压缸在零出力工况运行时,末级叶片将进入鼓风加热状态,低压缸内蒸汽和末级叶片的温度都会显著提升,影响低压缸运行的安全稳定。因此,研究变工况下运行特性对提高机组的效率具有重要的意义。

曹丽华等人^[3-5]通过计算流体动力学软件 CFX 在小容积流量工况下对汽轮机末级流场进行了数值计算,分析了动叶不同截面的流线特性,得到了汽轮机末级流场的涡流特性。王文营等人^[6]分析了在小流量下排汽缸内的涡系特性,得到了静压恢复系数和总压损失系数的分布规律。宋文希等人^[7]研究了低压缸进汽流量变化对某汽轮机低压通流区域流动鼓风特性的影响。陆英栋等人^[8]利用计算流体动力学软件 CFX 对在不同容积流量工况下的汽轮机末级流场进行全三维定常数计算,对末级流场的稳定性进行了分析。李明宇等人^[9]在小容积流量工况下对某 350 MW 超临界机组汽轮机低压缸的热力参数、流场、末级动叶强度等进行了数值计算,得到了在小容积流量工况下低压缸末级动叶的强度

和动应力变化规律。徐佳敏等人^[10-11]分析了低压缸进口蒸汽质量流量、进口蒸汽比体积、进口蒸汽温度、排汽压力对流场和末级叶片温度的影响。

目前,国内外针对低压缸零出力工况下低压末级流道内的流动工况进行了大量研究,而对于构建低压缸蒸汽流量变化工况的全域图谱,探究不同蒸汽流量下汽轮机低压缸低压流场以及温度场的研究少见发表。当低压缸蒸汽流量发生变化时,低压缸的蒸汽流场将发生相应的变化。研究结果可以作为电厂小容量流量运行数据库,特别对于零出力工况下末级叶片鼓风加热现象有参考预测价值,用来指导电厂现场的安全稳定运行。针对上述问题,本文建立了由末 5 级叶栅通道组成的低压缸通流区域单通道三维模型,构建了低压缸蒸汽流量变化工况的全域图谱,考虑了从 THA 工况降低至 1.5% THA 工况的 7 种运行工况。通过数值模拟的方法探究了在不同蒸汽流量下汽轮机低压缸低压流场与温度场的特性。

1 计算模型和网格划分

1.1 计算模型

图 1 给出了建立的低压缸通流区域单通道三维模型。低压缸通流区域由末 5 级叶栅通道组成,考虑 THA 工况的抽汽,在低压缸对应位置预留抽汽通道。在 THA 工况下,低压缸抽汽通道进行抽汽回热;在小流量工况下,低压缸抽汽通道关闭,低压缸不进行抽汽。为了提高 CFD 数值模拟的鲁棒性和收敛速度,将末级叶栅通道出口沿轴向延长。如图 1 所示,叶栅上部壁面为低压缸缸壁,叶栅下部壁面

为动叶轮毂,静叶栅保持静止,动叶栅绕轴以3 000 r/min进行定速旋转。由于叶栅两侧面为周期性边界,对图1中单通道三维模型进行全周复制,可得到低压缸通流区域全周通道三维模型,如图2所示。数值模拟的所有结果都适用于低压缸通流区域全周通道情况。

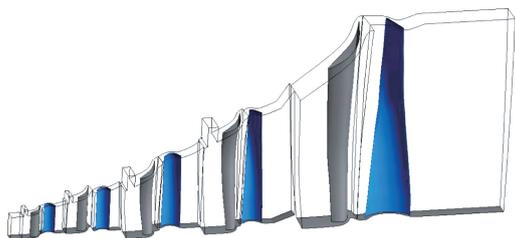


图1 低压缸通流区域单通道三维模型

Fig. 1 Single channel 3D model of flow area of low pressure cylinder

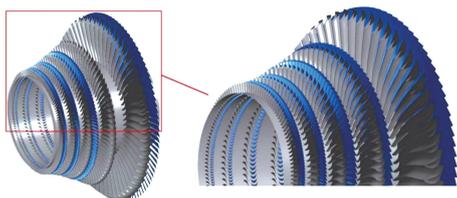


图2 低压缸通流区域全周通道三维模型

Fig. 2 3D model of the whole circumferential passage in the flow area of low pressure cylinder

1.2 网格划分

利用ICEM软件对低压缸通流区域进行有限体积网格划分,网格划分结果如图3所示。为了提高整体网格质量、加快计算收敛速度,整体网格采用六面体网格划分。在靠近叶片的前缘和尾缘位置处,进行蝶形网格划分,以适应前缘和尾缘处叶片的曲面变化形态。在贴近叶栅、汽缸壁及轮毂的壁面处,加密网格使得壁面 $y^+ < 1$,以满足湍流模型对网格精度的要求。对网格进行迭代光滑,提高角度、长宽比、增长率等代表网格质量的典型指标。为了减少不同叶栅通道传递数据的插值误差,调整网格交界处密度分布,使得不同叶栅通道交界处的网格密度保持连续。

采用计算流体动力学软件求解三维稳态RANS方程和SST $k-\omega$ 湍流模型,设置二阶求解精度。采

用多重网格收敛技术和时间推进法加快计算收敛速度。数值模拟工况、边界条件均与某电厂现场实际运行保持一致。低压缸进汽温度为213℃,排汽总压4 kPa。为了获得汽轮机全工况条件下低压缸内流场和温度场分布特点,构建了低压缸蒸汽流量变化工况的全域图谱,考虑了从THA工况降低至1.5% THA工况的7种运行工况。表1给出了低压缸蒸汽流量变化情况。电厂低压缸为两侧分缸对称布置,表1所示流量为两侧低压缸总蒸汽流量。

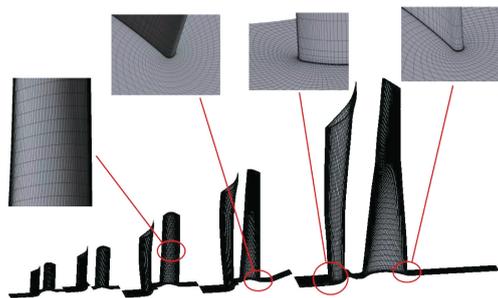


图3 低压缸通流区域有限体积网格划分

Fig. 3 Finite volume mesh division of flow area of low pressure cylinder

表1 低压缸蒸汽流量变化情况

Tab. 1 Working conditions of changing steam flow rates of low pressure cylinder

工况	低压缸流量/ $t \cdot h^{-1}$
100% THA	658
36.5% THA	240
18.2% THA	120
9.1% THA	60
5.8% THA	38
3.0% THA	20
1.5% THA	10

1.3 网格无关性验证

为了消除网格数量变化对数值结果产生差异影响,进行了网格无关性分析。图4给出了5.8% THA工况不同网格数量下末级动叶叶顶后10 mm处蒸汽温度沿叶高分布曲线。当网格节点数目到达604万时继续增加网格数目,计算结果不再发生变化。因此,所采用的网格节点数目为604万,网格数量与文献[11]相同。

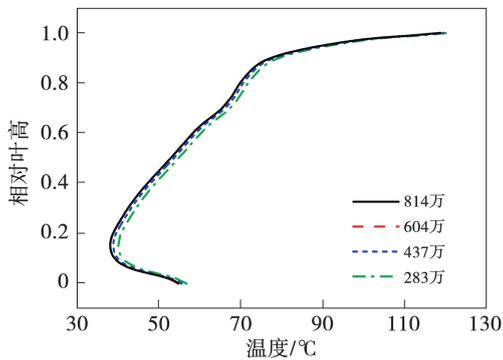


图4 5.8%THA工况不同网格数量下末级动叶叶顶后10 mm处蒸汽温度沿叶高分布

Fig.4 The distribution of steam temperature at 10 mm behind the tip of the last stage rotor blade along the blade height under 5.8%THA condition with different mesh numbers

1.4 数值模型校核

为了验证所采用的计算流体力学数值模拟方法正确性,本项目进行了数值模型校核工作,采用THA工况热平衡图数据校核。THA工况下,低压蒸汽进入对称布置的低压缸蒸汽通道,蒸汽做功后温度压力降低,排入冷凝器。低压缸设置两级抽汽回热以增加汽轮机热经济性。进行数值模拟计算,并保证计算工况和边界条件设置与THA工况保持一致。表2给出了THA工况下低压缸数值模拟的主要边界物性条件设置。可以看到,在THA工况下,利用数值模拟方法对低压缸进行模拟研究,数值偏差可以控制在3.9%以内,完全满足精度要求。

表2 THA工况下数值模拟计算和热平衡图对比

Tab.2 Comparison of numerical simulation calculation and heat balance diagram under THA condition

参数	热平衡图	数值模拟	相对偏差/%
进口流量/ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	693 050	667 613	3.67
6抽压力/kPa	0.140	0.137	2.14
6抽温度/ $^{\circ}\text{C}$	129	124	3.88
7抽压力/kPa	0.070	0.068	2.86
7抽温度/ $^{\circ}\text{C}$	90.2	88.2	2.22%

2 结果与分析

2.1 蒸汽流线分析

图5给出了不同蒸汽流量下低压末2级子午面

通道周向平均蒸汽流线。在THA设计工况下,蒸汽顺畅流过低压缸通道,没有产生二次涡流。蒸汽流量降低到36.5%THA和18.2%THA工况的流量时,末级动叶叶根处开始出现回流现象。蒸汽流量降低到9.1%THA和5.8%THA工况的流量时,末级动叶叶根和中弦区后形成两个明显的回流涡,大量出口蒸汽通过卷吸作用冲刷末级动叶中下区域。蒸汽流量降低到3.0%THA和1.5%THA工况的流量时,末级动叶后回流涡扩散到整个叶栅通道,并在次末级动叶后开始形成新的回流涡,叶栅通道蒸汽流动混乱度进一步增强,并在靶面上向腔体两侧均匀扩散,在腔体内形成两个明显流动涡。当靶面存在抽吸孔时,抽吸孔低压抽吸的作用使得射流冷气更容易直接撞击靶面,但冷气在腔体内的衰减速度也将加快。

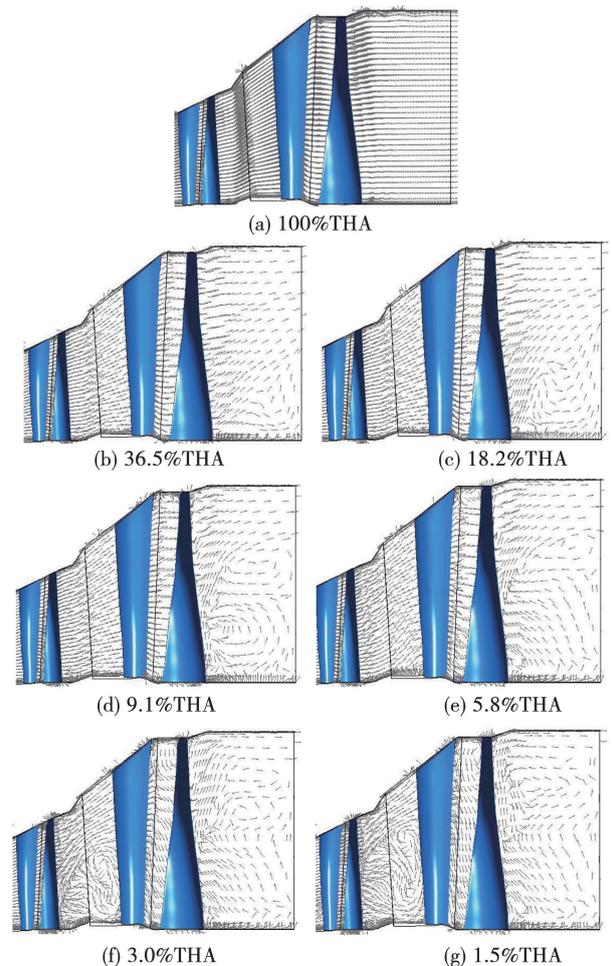


图5 不同蒸汽流量下低压末2级子午面通道蒸汽流线

Fig.5 Steam flow lines of the low pressure last two stage meridional plane passage at different steam flow rates

2.2 蒸汽压力分析

图6给出了不同蒸汽流量下末级动叶叶顶后15 mm处蒸汽压力沿叶高分布曲线。可以看到,蒸汽流量变化对末级动叶后压力分布影响不大。图7给出了不同蒸汽流量下末级动叶全周扭矩和内功率。全周扭矩和内功率均为半侧低压缸末级全周动叶负载,随着蒸汽流量降低,末级动叶内功率先降低再升高。末级动叶内功率在14% THA 工况下降低到0,在6% THA 工况下降为最低。在14% THA 工况蒸汽流量以下,末级动叶内功率均为负值,表明蒸汽对末级动叶做负功。此时,末级动叶已经进入鼓风加热状态。

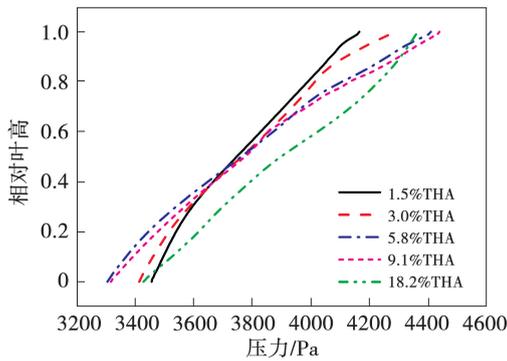


图6 不同蒸汽流量下末级动叶叶顶后15 mm处蒸汽压力沿叶高分布

Fig.6 The distribution of steam pressure at 15 mm behind the tip of the last stage rotor blade along the blade height at different steam flow rates

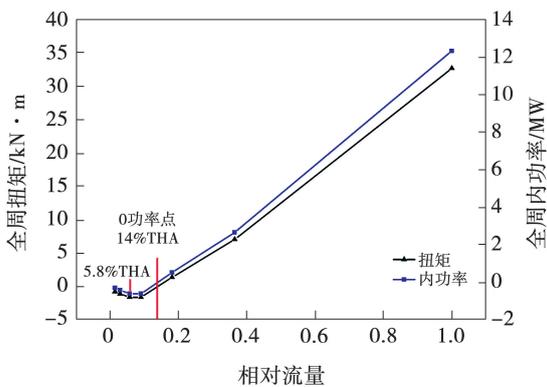


图7 不同蒸汽流量下末级动叶全周扭矩和内功率
Fig.7 The whole circumferential torque and internal power of the last stage rotor blade at different steam flow rates

2.3 蒸汽温度分析

图8给出了不同蒸汽流量下子午面通道温度分布云图。在THA设计工况下,蒸汽在叶栅通道中膨胀做功,将热能转换成动叶轴功输出。此时,从低压缸进口到出口方向,蒸汽温度呈现出逐渐降低的趋势。蒸汽流量降低到36.5% THA和18.2% THA 工况的流量,蒸汽热功转换总量降低,末级低压区域逐渐向上游方向扩展。当蒸汽流量降低到5.8% THA 工况的流量时,末级动叶进入鼓风加热工况。由于动叶顶部线速度高,此处动叶与蒸汽摩擦剧烈,导致动叶顶部附近蒸汽温度明显升高,达到120℃。当蒸汽流量降低到3.0% THA 工况的流量时,鼓风加热现象加剧,动叶顶部出现小范围的200℃高温区域。当蒸汽流量降低到1.5% THA 工况的流量时,200℃高温区域已扩展至整个末2级叶栅通道。

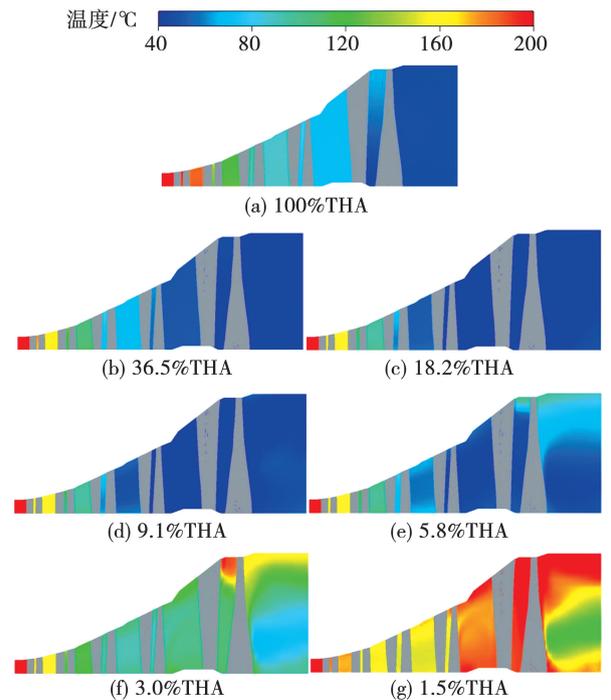


图8 不同蒸汽流量下子午面通道温度分布
Fig.8 Temperature distribution of meridional plane passage at different steam flow rates

为了进一步阐述鼓风加热对低压缸温度场的影响,图9给出不同蒸汽流量下末级动叶叶顶后15 mm处温度沿叶高分布。蒸汽流量从THA 工况的流量降低到18.2% THA 工况的流量,末级后排汽温度变化不大。当蒸汽流量降低到5.8% THA,末

级动叶进入鼓风加热状态,末级动叶叶顶附近蒸汽温度升高明显,而未级动叶根部附近蒸汽温度未发生明显变化。蒸汽流量降低到 3.0% THA 和 1.5% THA,末级动叶后整个叶高区域蒸汽温度发生明显提升。此时,末级动叶顶部后蒸汽温度升高最快,末级动叶中弦区由于受到出口蒸汽卷吸回流作用,温度提升较为滞后。

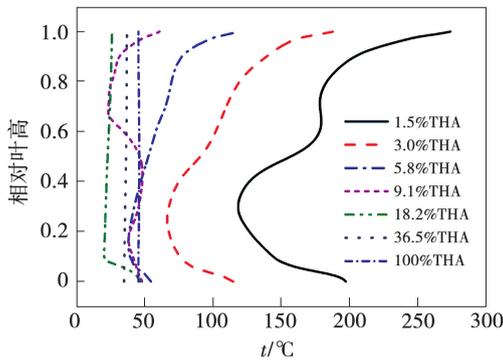


图9 不同蒸汽流量下末级动叶叶顶后 15 mm 处蒸汽温度沿叶高分布

Fig.9 The distribution of steam temperature at 15 mm behind the tip of the last stage rotor blade is distributed along the blade height at different steam flow rates

为了展示鼓风加热对低压缸末级叶片温度的影响,图 10 给出不同蒸汽流量下末级叶片温度分布。其中,SP 为静叶压力面,SS 为静叶吸力面,RP 为动叶压力面,RS 为动叶吸力面。蒸汽流量从 THA 降低到 18.2% THA,低压缸末级叶片表面的温度变化较小。当蒸汽流量降低到 5.8% THA 时,末级动叶进入鼓风加热状态,叶片温度明显升高,吸力面顶部出现小范围的 200 °C 高温区。当蒸汽流量降低到 3.0% THA 时,叶片温度继续升高,200 °C 高温区明显扩展至末级动叶顶部和静叶吸力面的叶尖区。蒸汽流量继续降低到 1.5% THA,整个末级叶片温度已经超过 200 °C,此时低压缸运行处于极度危险的状态,必须采取必要的措施使低压缸降温。

图 11 给出 3.0% THA 工况下末级静叶和动叶出口的压力、温度和速度分布。在小流量条件下,末级叶片出现明显的脱流现象,末级叶片顶部呈现出鼓风加热特性。

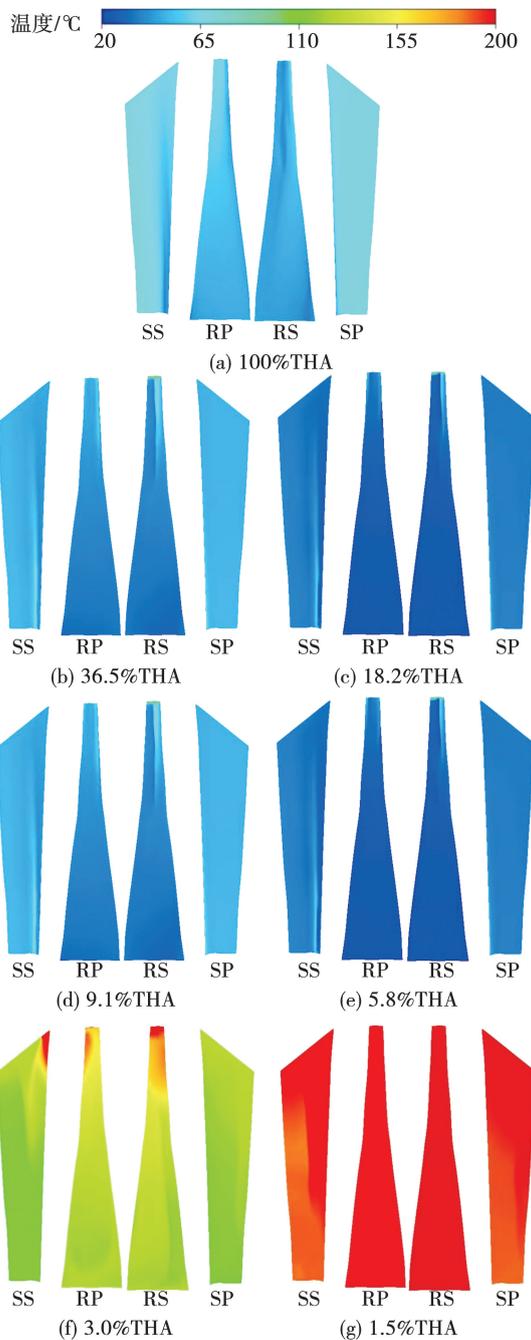
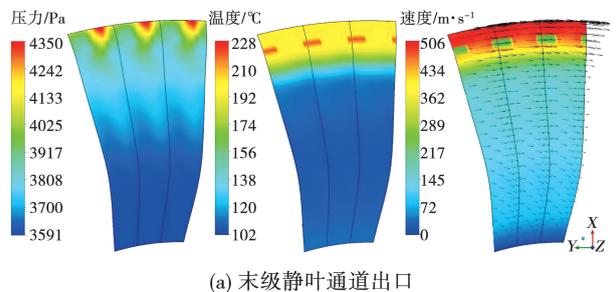


图 10 不同蒸汽流量下末级叶片温度分布

Fig.10 Temperature distribution of last stage blade at different steam flow rates



(a) 末级静叶通道出口

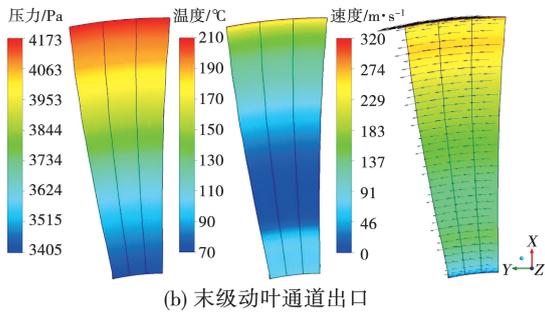


图 11 3.0% THA 工况下末级静叶、末级动叶出口的压力、温度、速度分布

Fig. 11 Distributions of pressure, temperature and velocity at outlet of last stage stator and rotor blades under 3.0% THA condition

3 结论

建立低压缸通流区域单通道三维模型,由末5级叶栅通道组成。共考虑了7种不同进汽流量下的运行工况。在不同进汽流量下通过数值模拟的方法探究了汽轮机低压缸低压流场以及温度场特性,结论为:

(1) 在 THA 工况下,蒸汽能够顺畅流过低压缸通道。随着蒸汽流量的降低,末级动叶叶根和中弦区出现明显的回流涡,大量出口蒸汽通过卷吸作用冲刷末级动叶中、下区域。

(2) 在 14% THA 蒸汽流量以下,末级动叶内功率为负值,此时蒸汽对末级动叶做负功,末级动叶进入鼓风加热状态。

(3) 当蒸汽流量降低到 5.8% THA 时,末级动叶进入鼓风加热工况,动叶顶部附近蒸汽的温度明显升高。蒸汽流量降低到 3.0% THA,鼓风加热现象加剧,动叶顶部出现小范围的 200 °C 高温区域。

(4) 当蒸汽流量降低到 5.8% THA 时,末级动叶吸力面顶部出现小范围 200 °C 高温区。蒸汽流量降低到 3.0% THA,200 °C 高温区扩展至末级动叶顶部和静叶吸力面的叶尖区。蒸汽流量降低到 1.5% THA,整个末级叶片温度已经超过 200 °C。此时,必须采取必要措施使低压缸降温。

参考文献:

- [1] 巫志华,李亮,丰镇平. 低压汽轮机三维叶栅通道内湿蒸汽两相流的数值模拟与分析[J]. 工程热物理学报,2007,28(5): 763-765.
WU Zhi-hua, LI Liang, FENG Zhen-ping. Three-dimensional simulation of wet steam two-phase flow in the stator of a low-pressure turbine[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(5): 763-765.
- [2] MZAUR Z, HEMANDEZ A, ROSSETTE R. Investigation of the failure of the L-0 blade[J]. Engineering Failure Analysis, 2006, 13(8): 1338-1350.
- [3] 曹丽华,王文龙,罗恒恒. 深度调峰工况下汽轮机低压缸最小流量的确定[J]. 机械工程学报,2020,56(16): 98-108.
CAO Li-hua, WANG Wen-long, LUO Heng-heng. Determination of minimum flow rate of low pressure cylinder of steam turbine under deep peak load regulation conditions[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(16): 98-108.
- [4] 徐美超,曹丽华,赵金峰,等. 小容积流量下汽轮机末级流场涡流特性研究[J]. 汽轮机技术,2019,61(5): 321-325.
XU Mei-chao, CAO Li-hua, ZHAO Jin-feng, et al. Analysis on vortex characteristics in last stage of steam turbine during the low volume flow conditions[J]. Turbine Technology, 2019, 61(5): 321-325.
- [5] 曹丽华,徐美超,胡鹏飞,等. 小容积流量下汽轮机末级流场涡流结构特性分析[J]. 汽轮机技术,2019,61(1): 1-3.
CAO Li-hua, XU Mei-chao, HU Peng-fei, et al. Analysis on vortex structure characteristics in last stage of steam turbine during the low volume flow conditions[J]. Turbine Technology, 2019, 61(1): 1-3.
- [6] 王文营,郭良丹,安国银,等. 小容积流量下汽轮机排汽缸流动特性分析[J]. 汽轮机技术,2019,61(1): 43-46.
WANG Wen-ying, GUO Liang-dan, AN Guo-yin, et al. Flow characteristics analysis of steam turbine exhaust cylinder under small volume flow rate[J]. Turbine Technology, 2019, 61(1): 43-46.
- [7] 宋文希,朱蓬勃,高庆,等. 汽轮机低压通流区鼓风态流场数值分析[J]. 热力透平,2019,48(1): 20-25.
SONG Wen-xi, ZHU Peng-bo, GAO Qing, et al. Numerical investigation on windage flow field characteristics in low pressure flow passage of turbine[J]. Thermal Turbine, 2019, 48(1): 20-25.